



梯级水库建设对岷江下游航道通航流量的影响

李家世，刘晓帆

(四川省交通勘察设计研究院有限公司，四川 成都 610017)

摘要：为研究上游梯级对岷江下段航道通航流量的影响，特别是枯季来水的影响，以高场水文站作为依据站，以彭山、五通桥水文站作为参证站，采用统计分析方法，首先分析岷江各相关水文站特征流量及年际变化趋势，总体反映岷江年平均流量、1—3月平均流量及保证率95%的流量年际变化特征，再采用高场水文站3个流量系列定量分析紫坪铺梯级、瀑布沟梯级蓄水后对岷江(龙溪口—合江门)航道流量、水位的影响，最后提出本段航道整治设计最小通航流量建议。研究结果表明，岷江上游干流及其支流梯级运行对枯期流量有较大的补偿作用，岷江干流各水文站1—3月平均流量及保证率95%的流量均表现为增加趋势；高场水文站保证率95%流量在紫坪铺梯级蓄水后增加 $93 \text{ m}^3/\text{s}$ ，在瀑布沟梯级蓄水后增加 $265 \text{ m}^3/\text{s}$ ，在2个梯级影响下共增加 $358 \text{ m}^3/\text{s}$ ，相应水位抬高0.43 m，瀑布沟梯级对岷江下段航道的通航流量影响更显著。

关键词：岷江；紫坪铺梯级；瀑布沟梯级；通航流量

中图分类号：U 61；TV 62

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)06-0164-07

Influence of upstream hydro-junctions on navigable discharge of Minjiang channel

LI Jia-shi, LIU Xiao-fan

(Sichuan Communications Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: To study the influence of the upstream hydro-junctions on the navigable discharge of the Minjiang channel, especially on the discharge in the dry season, taking Gaochang hydrological station as the base station, and Pengshan and Wutongqiao hydrological stations as reference stations, using the statistical analysis method, we analyze the characteristic flow and inter-annual variation trend of each hydrological station in the Minjiang River, which generally reflects the inter-annual variation characteristics of the average annual flow, the average flow from January to March and the guaranteed rate of 95%. After that, we analyze quantitatively the influence of the Zipingpu hydro-junction and Pubugou hydro-junction on the discharge and water level of the Minjiang channel using the three discharge series of the Gaochang hydrologic station. Finally, we put forward the suggestion of the minimum navigable discharge in the regulation design of this section. The results show that the operation of hydro-junctions in the upper reaches of the Minjiang River can increase the flow during the dry season. The average flow from January to March and the flow with the guaranteed rate of 95% of each hydrological station in the mainstream of the Minjiang River all show an increasing trend. The discharge of the Gaochang hydrological station with the guaranteed rate of 95% increases by $93 \text{ m}^3/\text{s}$ after Zipingpu cascade impoundment and increases by $265 \text{ m}^3/\text{s}$ after cascade impoundment. Under the influence of the two hydro-junctions, the discharge increases by $358 \text{ m}^3/\text{s}$ totally, and the water level with the guaranteed rate of 95% increases by 0.43 m. Pubugou hydro-junction has a more significant influence on the navigable discharge of the lower reaches of the Minjiang River.

Keywords: the Minjiang River; Zipingpu hydro-junction; Pubugou hydro-junction; navigable discharge

收稿日期：2020-09-09

作者简介：李家世(1981—)，男，高级工程师，从事港口与航道工程及水文专业工作。

岷江(乐山—宜宾段)作为国家内河高等级航道承担着重装设备运输的重要任务,是特大件装备产品进出四川的唯一通道,在四川乃至中国西部具有重要的战略地位。岷江(乐山—宜宾段)以航运为主,规划为内河Ⅲ级航道,全年通行1 000吨级船舶^[1]。近些年来,为满足发电、防洪、灌溉、供水等需求,岷江上游干流及其支流修建了较多梯级,改变了河流天然径流过程。为了分析上游梯级的修建对岷江航道通航流量(水位)的影响,本文以岷江高场水文站作为依据站,以岷江彭山站、五通桥站为参证站,根据实测水文资料统计对比分析岷江航道在上游梯级修建前后流量、水位的变化,进而为岷江航道整治设计最小通航流量的确定提供参考。

1 基本情况

岷江是长江上游的一级支流,位于四川盆地腹部区西部边缘,地理位置界于东经99°42'~104°40'和北纬28°20'~33°38'。发源于四川与甘肃接壤的岷山南麓,干流自北向南流经茂县、汶川至都江堰市,由都江堰分水为内、外二江,穿成都平原后在彭山汇合,继续南流,经青神至乐山乌尤寺右岸纳入大渡河、青衣江,转向东南流,经犍为,过宜宾,在宜宾城下汇入长江。干流全长735 km,流域面积13.58万km²,天然落差3 560 m,平均比降4.84‰。根据自然地理和河道特征划分,都江堰以上为上游,都江堰至乐山为中游,乐山以下为下游^[2]。岷江流域水系如图1所示。

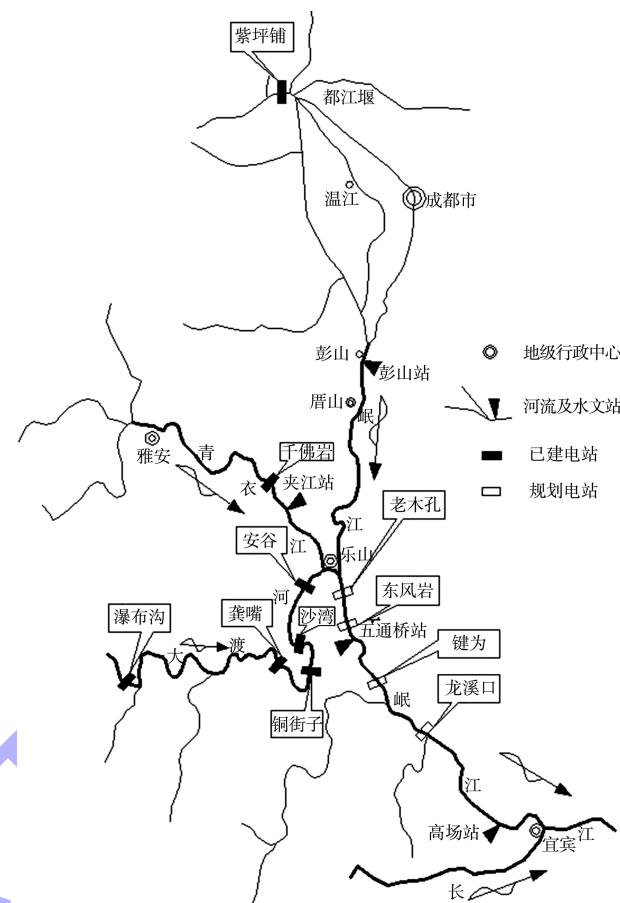


图1 岷江流域水系

1.1 水文站

岷江干流分布的水文(位)站主要有彭山、五通桥、高场水文站,其中高场水文站距离岷江河口27 km,位于岷江(龙溪口—合江门)81 km航道范围内。为研究上游兴建梯级对岷江(龙溪口—合江门)81 km航道通航流量,特别是枯季来水的影响情况,本研究以高场水文站作为依据站,以彭山水文站、五通桥水文站作为参证站,各站的基本情况见表1。

表1 岷江干流相关水文站

站名	距河口里程/km	集水面积/万 km ²	水位资料	流量资料
彭山	266	3.07	1938年至今	1938—1942年、1952年至今
五通桥	131	12.65	1953年至今	1953—1957年、1964年至今
高场	27	13.54	1939年至今	1939年至今

1.2 上游梯级

目前在岷江干流上游已建成具有不完全年调节能力的紫坪铺水利枢纽工程,支流大渡河上已建成

具有季调节能力的瀑布沟水电站。大渡河上其他已建梯级如龚嘴、铜街子、沙湾、安谷水电站以及青衣江上已建的千佛岩水电站均为日调节水库,对径

流调节能力有限,因此本研究主要分析岷江干流上游紫坪铺水利枢纽工程、大渡河瀑布沟水电站对岷

江(龙溪口—合江门)81 km 航道通航流量(水位)的影响程度。各枢纽的工程特性见表 2。

表 2 岷江干流及支流相关枢纽工程特性

水库名称	所在河流	流域面积/万 km ²	总库容/亿 m ³	调节库容/亿 m ³	调节性能	建成年份
紫坪铺	岷江上游干流	2.27	11.12	7.74	不完全年调节	2005
瀑布沟	大渡河	6.85	53.90	38.82	季调节	2010
龚嘴	大渡河	7.61	3.10	—	日调节	1972
铜街子	大渡河	7.64	2.60	0.30	日调节	1992
沙湾	大渡河	7.65	0.46	—	日调节	2009
安谷	大渡河	7.67	0.63	—	日调节	2015
千佛岩	青衣江	1.25	0.27	—	日调节	2010

1.2.1 紫坪铺水利枢纽

紫坪铺水利枢纽工程位于四川省成都市西北 60 余公里的岷江上游,在都江堰市麻溪乡。工程以灌溉和供水为主,兼有发电、防洪、环境保护、旅游等功用。工程坝址以上控制流域面积 2.27 万 km²,正常蓄水位 877.00 m 相应库容 9.98 亿 m³,水库总库容 11.12 亿 m³,正常蓄水位至汛期限制水位之间库容 4.247 亿 m³,死库容 2.24 亿 m³,调节库容 7.74 亿 m³,为不完全年调节水库。工程 2001 年 3 月 29 日正式动工兴建,2005 年 11 月蓄水发电,2006 年 12 月工程竣工。

1.2.2 瀑布沟水电站

瀑布沟水电站位于大渡河中游尼日河汇口上游角托附近,是大渡河流域水电开发的控制性水库之一,是一座以发电为主、兼有防洪拦沙等综合的特大型水利水电枢纽工程,控制集水面积为 6.85 万 km²,占大渡河流域面积的 88.5%,多年平均流量为 1 230 m³/s。水库正常蓄水位 850 m,总库容 53.9 亿 m³,其中调洪库容 10.56 亿 m³、调节库容 38.82 亿 m³,具有季调节能力。工程于 2004 年 3 月开工建设,至 2010 年 12 月 26 日 6 台机组全部投产,瀑布沟水电站竣工。

2 上游梯级对岷江航道通航流量的影响

2.1 径流年内分布

研究基于彭山水文站 1980—2010 年日均流量、五通桥水文站 1980—2010 年日均流量及高场水文站 1980—2016 年日均流量等资料。

岷江流域地跨上游高原气候区及中下游盆地亚热带湿润季风气候区,径流主要由降水形成。各水文站径流年内分布不均,变化趋势基本一致,每年汛期一般是 5—10 月,多年月平均最大流量出现在 7 月,枯期是 11 月至次年 4 月,最枯月份是 1—3 月,这与降水特性是一致的。各水文站多年月平均流量年内分布如图 2 所示。

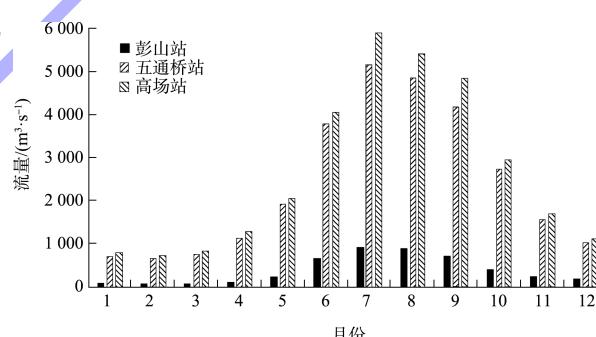


图 2 1980—2010 年水文站多年月平均流量年内分布

2.2 特征流量及趋势

对岷江干流彭山水文站、五通桥水文站 1980—2010 年资料、高场水文站 1980—2016 年资料分别逐年统计其年平均流量、1—3 月平均流量及保证率 95% 的流量^[3], 分别绘制各水文站特征流量过程及趋势线,结果见图 3。

从图 3 可知,各水文站的年平均流量有减小的趋势。分析其原因,城镇化发展导致工农业生产用水量增加,与气候变化共同引起岷江流域径流量有缓慢减小趋势。径流的年内分配也有较大变化,各水文站 1—3 月平均流量及保证率 95% 的

流量均表现为增加趋势,特别是高场水文站2011—2016年枯期流量增加显著。这主要是上游

梯级的运行对枯季流量有一定的补偿作用,特别是瀑布沟运行后较为明显。

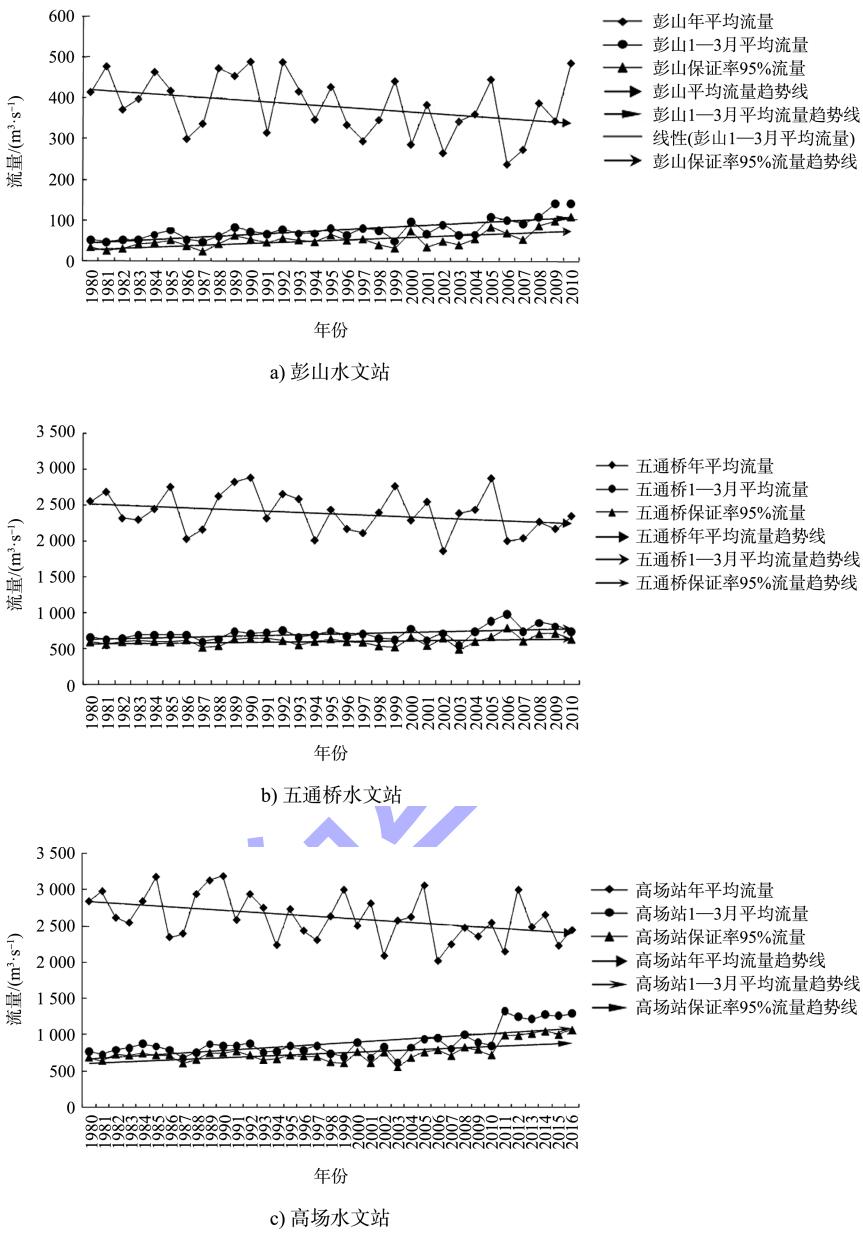


图3 各水文站特征流量

2.3 上游梯级对岷江下段航道流量及水位的影响

2.3.1 上游梯级对高场站流量的影响

对高场站1980—2005年、2006—2010年、2011—2016年3个系列月平均流量、月最小流量和不同保证率对应的流量进行统计,成果如表3~5所示。

从表3可以看出,紫坪铺梯级蓄水后,在枯季11月至翌年4月,除11—12月月均流量略有减小外,1—4月月均流量均变大,最枯月2月份流

量由 $717 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $819 \text{ m}^3/\text{s}$,增加了14.2%,而中洪水期5—10月,特别是汛期7—9月月均流量在紫坪铺梯级蓄水后大幅减小,梯级削峰作用明显;瀑布沟梯级蓄水后,高场水文站枯期(11月至翌年4月)流量有了更大幅度的增加,最枯月2月份平均流量由 $819 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $1188 \text{ m}^3/\text{s}$,增加了45.1%;在紫坪铺、瀑布沟两梯级共同影响下,除11月外,高场水文站枯期月均流量增加显著,最枯月2月份增加了65.7%。

从表 4 可以看出, 紫坪铺梯级蓄水后, 除了 8、11 月外, 高场水文站月最小流量均表现为增加, 汛期月最小流量增加值大于枯期; 瀑布沟梯级蓄水后, 各月最小流量均表现为增加, 同样表现为汛期最小流量增加值大于枯期, 瀑布沟蓄水对高场站月最小流量的影响程度明显大于紫坪铺蓄水。

从表 5 可以看出, 紫坪铺梯级蓄水后, 高场水文站保证率 70%~98% 流量均大于蓄水前流量,

保证率 95% 流量由 $662 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $755 \text{ m}^3/\text{s}$, 增加了 $93 \text{ m}^3/\text{s}$; 瀑布沟梯级蓄水后, 高场水文站保证率 70%~98% 流量进一步增加, 其中保证率 95% 流量由 $755 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $1020 \text{ m}^3/\text{s}$, 增加了 $265 \text{ m}^3/\text{s}$ 。从调节性能上分析, 尽管大渡河瀑布沟梯级是季调节, 岷江上游干流紫坪铺梯级是不完全年调节, 但是瀑布沟梯级的调节库容显著大于紫坪铺梯级调节库容, 因此瀑布沟梯级对岷江下段航道的通航流量影响更显著。

表 3 紫坪铺梯级、瀑布沟梯级蓄水前后高场水文站月均流量对比

月份	月平均流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)								
	紫坪铺蓄水前 1980—2005 年	紫坪铺蓄水后 2006—2010 年	瀑布沟蓄水后 2011—2016 年	紫坪铺蓄水后		瀑布沟蓄水后		共同影响	
				差值	变化率/%	差值	变化率/%	差值	变化率/%
1	772	900	1 232	128	16.6	332	36.9	460	59.6
2	717	819	1 188	102	14.2	369	45.1	471	65.7
3	847	957	1 372	110	13.0	415	43.4	525	62.0
4	1 256	1 307	1 458	51	4.1	151	11.6	202	16.1
5	2 161	1 892	1 820	-269	-12.4	-72	-3.8	-341	-15.8
6	4 084	3 298	3 195	-786	-19.2	-103	-3.1	-889	-21.8
7	6 296	4 620	5 767	-1 676	-26.6	1 147	24.8	-529	-8.4
8	5 954	4 632	4 440	-1 322	-22.2	-192	-4.1	-1 514	-25.4
9	4 952	3 986	3 558	-966	-19.5	-428	-10.7	-1 394	-28.2
10	3 265	2 658	2 814	-607	-18.6	156	5.9	-451	-13.8
11	1 812	1 590	1 591	-222	-12.3	1	0.1	-221	-12.2
12	1 115	1 112	1 361	-3	-0.3	249	22.4	246	22.1
多年平均	2 783	2 324	2 494	-	-	-	-	-	-

表 4 紫坪铺梯级、瀑布沟梯级蓄水前后高场水文站月最小流量对比表

月份	月最小流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)								
	紫坪铺蓄水前 1980—2005 年	紫坪铺蓄水后 2006—2010 年	瀑布沟蓄水后 2011—2016 年	紫坪铺蓄水后		瀑布沟蓄水后		共同影响	
				差值	变化率/%	差值	变化率/%	差值	变化率/%
1	406	534	890	128	31.5	356	66.7	484	119.2
2	364	495	853	131	36.0	358	72.3	489	134.3
3	396	502	1 028	106	26.8	526	104.8	632	159.6
4	464	554	964	90	19.4	410	74.0	500	107.8
5	425	747	1 062	322	75.8	315	42.2	637	149.9
6	794	1 190	2 125	396	49.9	935	78.6	1 331	167.6
7	1 280	1 690	3 487	410	32.0	1 797	106.3	2 207	172.4
8	1 360	966	3 025	-394	-29.0	2 059	213.1	1 665	122.4
9	1 090	1 670	2 385	580	53.2	715	42.8	1 295	118.8
10	1 130	1 400	1 875	270	23.9	475	33.9	745	65.9
11	693	610	1 029	-83	-12.0	419	68.7	336	48.5
12	536	600	1 011	64	11.9	411	68.5	475	88.6

表5 紫坪铺梯级、瀑布沟梯级蓄水前后高场水文站不同保证率流量对比表

保证率/%	流量/(m³·s⁻¹)								
	紫坪铺蓄水前 1980—2005年	紫坪铺蓄水后 2006—2010年	瀑布沟蓄水后 2011—2016年	紫坪铺蓄水后		瀑布沟蓄水后		共同影响	
				差值	变化率/%	差值	变化率/%	差值	变化率/%
70	1 040	1 078	1 360	38	3.7	282	26.2	320	30.8
75	927	1 010	1 310	83	9.0	300	29.7	383	41.3
80	839	933	1 240	94	11.2	307	32.9	401	47.8
85	780	882	1 190	102	13.1	308	34.9	410	52.6
90	724	822	1 110	98	13.5	288	35.0	386	53.3
95	662	755	1 020	93	14.0	265	35.1	358	54.1
98	610	700	896	90	14.8	196	28.0	286	46.9

2.3.2 上游梯级对五通桥站流量影响

五通桥水文站受资料限制,缺2011—2016年受瀑布沟蓄水影响后的资料,采用1980—2010年高场水文站与五通桥水文站枯水期(1—3月)同序列月均流量资料,建立两站月均流量的相关关系(图4)。以此关系推求五通桥水文站受瀑布沟蓄水影响后的枯期流量。

从表6可以看出,紫坪铺梯级蓄水后,五通桥水文站保证率70%~98%流量均大于蓄水前流量,保证率95%流量由585 m³/s增加至689 m³/s,增加了104 m³/s;瀑布沟梯级蓄水后,五通桥水文站保

证率70%~98%流量进一步增加,其中保证率95%流量由689 m³/s增加至885 m³/s,增加了196 m³/s。

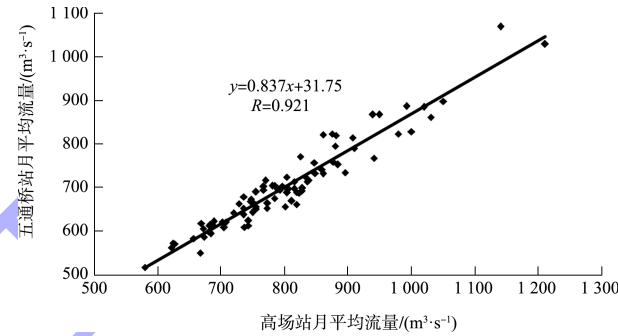


图4 五通桥水文站与高场水文站枯水期(1—3月)月平均流量相关关系

表6 紫坪铺梯级、瀑布沟梯级蓄水前后五通桥水文站不同保证率流量对比

保证率/%	流量/(m³·s⁻¹)								
	紫坪铺蓄水前 1980—2005年	紫坪铺蓄水后 2006—2010年	瀑布沟蓄水后 2011—2016年	紫坪铺蓄水后		瀑布沟蓄水后		共同影响	
				差值	变化率/%	差值	变化率/%	差值	变化率/%
70	933	1 020	1 170	87	9.3	150	14.7	237	25.4
75	822	921	1 128	99	12.0	207	22.5	306	37.3
80	743	854	1 070	111	14.9	216	25.2	327	44.0
85	684	791	1 028	107	15.6	237	29.9	344	50.3
90	637	744	961	107	16.8	217	29.1	324	50.8
95	585	689	885	104	17.8	196	28.5	300	51.4
98	530	613	782	83	15.7	169	27.5	252	47.5

2.3.3 上游梯级对高场站水位影响

2.3.3.1 高场水文站水位流量关系的建立

根据高场水文站2006—2010年实测流量成果拟定高场水文站水位流量关系综合曲线(图5)。该水位流量关系高水部分外延,是结合其他各年高水实测流量成果,采用斯蒂文斯法外延^[4],从图5可见高水外延部分是通过实测点群中心,其定线成果是合理的。

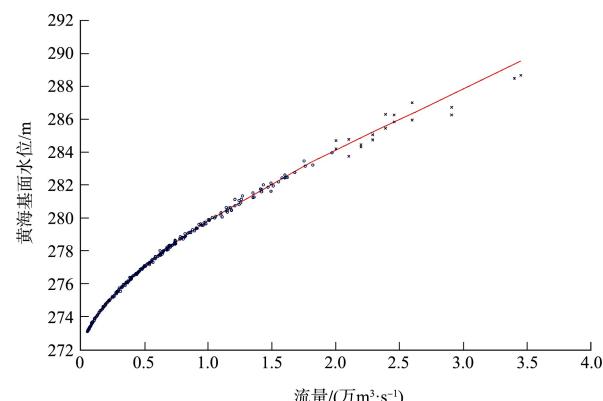


图5 高场水文站水位流量关系综合曲线

2.3.3.2 上游梯级对高场站水位影响

根据高场水文站综合水位流量关系曲线, 推求不同保证率流量对应的水位, 成果如表 7 所示。由表 7 可见, 紫坪铺梯级蓄水后, 高场水文站保证率 70%~98% 水位均高于蓄水前水位, 保证率 95% 水位由 273.30 m 增加至 273.43 m, 增加了

0.13 m; 瀑布沟梯级蓄水后, 高场水文站保证率 70%~98% 水位进一步增加, 其中保证率 95% 水位由 273.43 m 增加至 273.73 m, 增加了 0.30 m; 在紫坪铺、瀑布沟 2 个梯级共同影响下, 高场水文站保证率 95% 水位共增加了 0.43 m, 这对于通航而言是非常有利的。

表 7 紫坪铺梯级、瀑布沟梯级蓄水前后高场水文站不同保证率水位对比

保证率/%	紫坪铺蓄水前		紫坪铺蓄水后		瀑布沟蓄水后		共同影响差值
	1980—2005 年	2006—2010 年	2011—2016 年	紫坪铺蓄水后差值	瀑布沟蓄水后差值		
70	273.80	273.85	274.15	0.05	0.30	0.35	
75	273.66	273.76	274.08	0.10	0.32	0.42	
80	273.55	273.67	274.01	0.12	0.34	0.46	
85	273.47	273.60	273.93	0.13	0.33	0.46	
90	273.39	273.52	273.84	0.13	0.32	0.45	
95	273.30	273.43	273.73	0.13	0.30	0.43	
98	273.22	273.35	273.60	0.13	0.25	0.38	

2.4 岷江航道设计最小通航流量的确定

前述分析表明, 瀑布沟建成后枯期流量显著增加, 高场水文站保证率 95% 流量增加 $358 \text{ m}^3/\text{s}$, 达到 $1020 \text{ m}^3/\text{s}$, 保证率为 98% 时, 高场水文站流量增加 $286 \text{ m}^3/\text{s}$, 达到 $896 \text{ m}^3/\text{s}$ 。紫坪铺、瀑布沟梯级修建运行后, 岷江下游航道水文条件发生了明显变化, 枯期流量显著增加。根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》规定, 应选取变化后有代表性的资料。高场水文站 2011—2016 年资料系列虽然不长, 但可以反应河段水文条件变化情况, 根据上述统计结果并结合岷江(龙溪口—合江门)达到Ⅲ级航道需要的最小流量为 $900 \text{ m}^3/\text{s}$, 因此岷江(龙溪口—合江门)81 km 航道整治设计最小通航流量采用 $900 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

水文站保证率 95% 流量增加 $265 \text{ m}^3/\text{s}$, 在紫坪铺、瀑布沟 2 个梯级共同影响下, 高场水文站保证率 95% 流量共增加 $358 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3) 紫坪铺梯级蓄水后, 五通桥水文站保证率 95% 流量增加 $104 \text{ m}^3/\text{s}$, 瀑布沟梯级蓄水后, 五通桥水文站保证率 95% 流量增加 $196 \text{ m}^3/\text{s}$, 在紫坪铺、瀑布沟 2 个梯级共同影响下, 五通桥水文站保证率 95% 流量共增加 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4) 紫坪铺梯级蓄水后, 高场水文站保证率 95% 水位增加 0.13 m, 瀑布沟梯级蓄水后, 高场水文站保证率 95% 水位增加 0.30 m, 在紫坪铺、瀑布沟 2 个梯级共同影响下, 高场水文站保证率 95% 水位共增加了 0.43 m, 这对于通航而言是非常有利的。

5) 尽管大渡河瀑布沟梯级是季调节, 岷江上游干流紫坪铺梯级是不完全年调节, 但是瀑布沟梯级的调节库容显著大于紫坪铺梯级调节库容, 因此瀑布沟梯级对岷江下段航道的通航流量影响更显著。

6) 瀑布沟蓄水后岷江航道枯期流量显著增加, 高场水文站保证率 95% 流量增加至 $1020 \text{ m}^3/\text{s}$, 保证率 98% 流量增加至 $896 \text{ m}^3/\text{s}$, 结合岷江(龙溪口—合江门)达到Ⅲ级航道需要的最小流量为 $900 \text{ m}^3/\text{s}$, 因此确定岷江(龙溪口—合江门)81 km 航道整治设计最小通航流量采用 $900 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3 结论

1) 由于城镇化发展导致工农业生产用水量增加以及气候变化共同引起岷江流域年径流量有缓慢减小趋势。岷江上游干流及其支流梯级运行对枯期流量有较大的补偿作用, 径流的年内分配有较大变化, 岷江干流各水文站 1—3 月平均流量及保证率 95% 的流量均表现为增加趋势。

2) 紫坪铺梯级蓄水后, 高场水文站保证率 95% 流量增加 $93 \text{ m}^3/\text{s}$, 瀑布沟梯级蓄水后, 高场